



COORDENADORIA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

EMERSON WATANABE

FERNANDA MARIA VITTORELLI WILL

IZABELA CRISTINA CAMARGO MACHADO

LUCAS EDUARDO PEREIRA DA SILVA JUNIOR

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ALGORITMOS DE *ADVANCED
PLANNING & SCHEDULING***

**Sorocaba/SP
2022**

Emerson Watanabe

Fernanda Maria Vittorelli Will

Izabela Cristina Camargo Machado

Lucas Eduardo Pereira da Silva Junior

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ALGORITMOS DE *ADVANCED
PLANNING & SCHEDULING***

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
de Sorocaba, como exigência parcial para
obtenção do diploma de graduação em
Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Me/Dr Rodrigo Luiz
Gigante

**Sorocaba/SP
2022**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTCA FACENS
BIBLIOTECÁRIA FACENS**

Eliane da Rocha - 8062/8a

A532

Análise Estatística de algoritmos de Advanced Planning & Scheduling / por Lucas Pereira ... *[et al.]*. – Sorocaba, SP: [s.n.], 2022.
XXf.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Centro Universitário Facens, Coordenadoria de Engenharia de Produção – Curso de Engenharia de Produção, 2022.
Orientador: Prof. Me. Rodrigo Luiz Gigante

1. Algoritmos. 2. Estatística. 3. Simulação. I. Pereira, Lucas. II. Watanabe, Emerson. III. Will, Fernanda. IV. Machado, Izabela. V. Centro Universitário Facens. VI. Título.

CDD 658.5

Emerson Watanabe
Fernanda Maria Vittorelli Will
Izabela Cristina Camargo Machado
Lucas Eduardo Pereira da Silva Junior

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ALGORITMOS DE *ADVANCED*
*PLANNING & SCHEDULING***

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
de Sorocaba, como exigência parcial para
obtenção do diploma de graduação em
Engenharia de Produção.

Sorocaba, 11 de novembro de 2022.

Banca examinadora



Prof. Me Rodrigo Luiz Gigante



Prof. Dr Adilson Rocha

Monique Yngrid da Silva

Prof. Esp Monique Yngrid da Silva

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de dedicar meus sinceros agradecimentos aos meus pais, pois sem o apoio e dedicação deles, nada nessa trajetória seria possível. Sem o incentivo, a força e o amor, principalmente nos momentos mais críticos da minha vida. Me sinto totalmente abençoado, pela oportunidade e aprendizado passados pelos meus pais.

Segundamente, agradecer a Fernanda, Lucas e Izabela, que tornaram essa trajetória cheia de desafios, uma construção de amizade para vida. Essa inesquecível jornada de aprendizado e cooperação, que se iniciou no segundo semestre me proporcionou ótimos momentos

Gostaria de dedicar meu agradecimento ao nosso professor, coordenador atual e orientador. Sr. Rodrigo Luiz Gigante, que nos ajudou desde o início da faculdade e por se dedicar aos seus alunos da melhor forma possível.

Agradeço também aos professores Rosana e ao Gilberto pelo grande suporte para que o TCC fosse possível.

A todos os envolvidos, a instituição pelo ambiente e aprendizado passados nesse percurso por todos os professores, dedico todos os meus esforços e gratidão, a cada um por acreditar, incentivar e confiar na minha dedicação.

Emerson Watanabe

Agradeço minha família por todo carinho e apoio ao longo da minha vida. Sou abençoado por ter sido criado por pessoas tão maravilhosas. Em especial, agradeço meu pai que, além de ser meu melhor amigo, me ensinou tudo que sei até hoje sobre a vida. A ele devo tudo e pago com dedicação e companheirismo.

Os conteúdos passados no ensino médio e pré-vestibular me auxiliaram em todos meus desafios até hoje e, portanto, agradeço meus professores desse período que inclusive me fizeram entender minhas aptidões.

Ao nosso orientador Rodrigo Gigante digo obrigado por acreditar no meu trabalho e me dar a oportunidade de desenvolver projetos de grande valor à minha carreira.

Agradeço ao meu grupo e professores da faculdade por me acompanharem durante todo curso. Vocês fazem parte do meu progresso profissional e do desenvolvimento deste trabalho.

Lucas Eduardo Pereira da Silva Junior

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por estar comigo em todos os momentos me tornando capaz de enfrentar cada barreira encontrada ao longo desses anos, pois sem Ele eu não sou nada e seria meramente incapaz de chegar aonde estou.

Ao professor orientador, professores e mestres do curso de produção que me acompanharam e me ajudaram no aprimoramento deste projeto.

Aos meus pais e familiares, em especial minha mãe Isabel, meu pai Nelson, meu sobrinho Antony, minha tia Joana e meu namorado Carlos, por todo amor incondicional, onde sempre estiveram ao meu lado, me incentivando, me apoiando e me dando suporte necessário. Todo o resultado que eu obtive até aqui, é a prova do esforço e dedicação deles a mim.

Aos meus colegas, que junto a mim, se esforçaram durante esse período de cinco anos e hoje estamos juntos concretizando este sonho.

Fernanda Will

Agradeço a Deus, meus pais e amigos, que me sustentaram e apoiaram até aqui.

Izabela Cristina

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Simulação para 2 máquinas – Cenário 1	42
FIGURA 2.	Simulação para 2 máquinas – Cenário 2	42
FIGURA 3.	Simulação para 2 máquinas – Cenário 3	42
FIGURA 4.	Simulação para 2 máquinas – Cenário 4	43
FIGURA 5.	Simulação para 2 máquinas – Cenário 5	43
FIGURA 6.	Simulação para 2 máquinas – Cenário 6	43
FIGURA 7.	Simulação para 5 máquinas – Cenário 1	46
FIGURA 8.	Simulação para 5 máquinas – Cenário 2	47
FIGURA 9.	Simulação para 5 máquinas – Cenário 3	47
FIGURA 10.	Simulação para 5 máquinas – Cenário 4	48
FIGURA 11.	Simulação para 5 máquinas – Cenário 5	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	Cenários das regras	32
TABELA 2.	Cenários dos métodos para 2 máquinas	32
TABELA 3.	Cenários dos métodos para 3 máquinas	33
TABELA 4.	Médias para 1 máquina. Cenário 1	35
TABELA 5.	Desvios Percentuais para 1 máquina. Cenário 1	35
TABELA 6.	Médias para 1 máquina. Cenário 2	36
TABELA 7.	Desvios Percentuais para 1 máquina. Cenário 2	36
TABELA 8.	Médias para 1 máquina. Cenário 3	36
TABELA 9.	Desvios Percentuais para 1 máquina. Cenário 3	36
TABELA 10.	Médias para 1 máquina. Cenário 4	37
TABELA 11.	Desvios Percentuais para 1 máquina. Cenário 4	37
TABELA 12.	Médias para 1 máquina. Cenário 5	37
TABELA 13.	Desvios Percentuais para 1 máquina. Cenário 5	38
TABELA 14.	Médias para 2 máquinas. Cenário 1	38
TABELA 15.	Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 1	39
TABELA 16.	Médias para 2 máquinas. Cenário 2	39
TABELA 17.	Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 2	39
TABELA 18.	Médias para 2 máquinas. Cenário 3	39
TABELA 19.	Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 3	39
TABELA 20.	Médias para 2 máquinas. Cenário 4	40
TABELA 21.	Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 4	40
TABELA 22.	Médias para 2 máquinas. Cenário 5	40
TABELA 23.	Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 5	40
TABELA 24.	Médias para 2 máquinas. Cenário 6	40
TABELA 25.	Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 6	41
TABELA 26.	Médias para 5 máquinas. Cenário 1	44
TABELA 27.	Desvios Percentuais para 5 máquinas. Cenário 1	44
TABELA 28.	Médias para 5 máquinas. Cenário 2	44
TABELA 29.	Desvios Percentuais para 5 máquinas. Cenário 2	44

TABELA 30.	Médias para 5 máquinas. Cenário 3	45
TABELA 31.	Desvios Percentuais para 5 máquinas. Cenário 3	45
TABELA 32.	Médias para 5 máquinas. Cenário 4	45
TABELA 33.	Desvios Percentuais para 5 máquinas. Cenário 4	45
TABELA 34.	Médias para 5 máquinas. Cenário 5	45
TABELA 35.	Desvios Percentuais para 5 máquinas. Cenário 5	45

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IES.....	Instituição de Ensino Superior
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FACENS	Faculdade de Engenharia de Sorocaba
APS	<i>Advanced Planning & Scheduling</i>
PCP	Planejamento e Controle da Produção
ODS.....	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Planejamento e Controle da Produção.....	17
2.2 Advanced Planning & Scheduling	18
2.4 Tipos de modelo em APS.....	19
2.3 REGRAS E MÉTODOS EM APS	20
2.4 ALGORITMOS DE PROGRAMAÇÃO	21
2.4.1 Python	22
2.4.2 Variáveis.....	22
2.4.3 Funções.....	22
2.4.4 Tipos de dados.....	23
2.4.5 Estrutura de dados	23
2.4.6 Listas em Python.....	23
2.5 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS	24
2.6 ESTATÍSTICA	24
2.6.1 Estatística Inferencial	25
2.6.2 Distribuição Normal ou Gaussiana	25
2.6.3 População e Amostra	25
2.6.4 Intervalo de Confiança.....	26
2.6.5 Média amostral	26
2.6.6 Desvio padrão amostral.....	27
2.6.7 Desvio percentual.....	27
2.7 JUSTIFICATIVA	27
3 METODOLOGIA.....	28
3.1 Algoritmos das regras.....	28
3.2 Algoritmos dos métodos	28
3.3 Algoritmos dos resultados de desempenho.....	31
3.4 Elaboração estatística	31
3.5 Simulação.....	33
4 RESULTADOS	34

4.1 Resultados estatísticos das regras.....	34
4.2 Resultados estatísticos dos métodos para 2 máquinas.....	38
4.3 Resultados de simulação dos métodos para 2 máquinas	41
4.4 Resultados estatísticos dos métodos para 5 máquinas.....	44
4.5 Resultados de simulação dos métodos para 5 máquinas	46
5 CONCLUSÃO.....	50
6 REFERÊNCIAS.....	51

RESUMO

Advanced Planning & Scheduling (APS) é a atividade responsável por sequenciar linhas de produção nos setores de Planejamento e Controle da Produção (PCP). Sua utilização é peça chave para manter a fluidez do processo e garantir que as tarefas sejam executadas no tempo esperado. Em APS, há regras e métodos de sequenciamento, os quais são algoritmos de ordenação que tem por objetivo otimizar processos. O intuito deste trabalho é analisar estatisticamente os desempenhos das regras em diferentes cenários e compará-los entre si. Deste modo, é possível entender quando cada algoritmo é aconselhado e quais vantagens um traz sobre os demais. Para isso, os algoritmos foram recriados utilizando a linguagem de programação *Python* para sequenciar listas de tarefas. Posteriormente, foram colhidas amostras geradas aleatoriamente em *Python* para trazer o intervalo de confiança das médias dos resultados obtidos em diferentes cenários. Ainda, foram criadas simulações de eventos discretos no *Software FlexSim* para apresentar os resultados de desempenhos na prática. Este trabalho traz uma perspectiva aprofundada sobre os ganhos das regras e métodos e como eles se comportam em diferentes situações.

Palavras-Chave: *Advanced Planning & Scheduling*. Algoritmos. Regras. Métodos. Simulação de eventos discretos.

ABSTRACT

Advanced Planning & Scheduling (APS) is the activity responsible for sequencing production lines in the Production Planning and Control (PCP) sectors. Its use is key to maintaining the fluidity of the process and ensuring that tasks are finished in time. In APS, there are sequencing rules and methods, which are sorting algorithms that optimize processes. The goal of this work is to statistically analyze the performance of the rules in different scenarios and compare them with each other. Thereby, it is possible to understand when each algorithm is recommended according to the situation and what are the advantages. To do that, the algorithms were recreated using the programming language called Python to sequence task lists. After that, randomly generated samples were collected also in Python to get the confidence interval of the results' averages obtained in different scenarios. Also, discrete event simulations were created in FlexSim Software to get the performance results in practice. This work brings an in-depth perspective on the gains of rules and methods and how they behave in different situations.

Keywords: Advanced Planning & Scheduling. Algorithms. Rules. Methods. Discrete event simulation.

1 INTRODUÇÃO

Planejamento e Controle da Produção (PCP) é um sistema de gestão encontrado nos setores da indústria. Seu objetivo principal é garantir que a produção e a demanda se equiparem entre si. Segundo Cardoso (2021 p. 7), o PCP tem o propósito principal de alinhar a capacidade produtiva com a demanda dos clientes para reduzir sobrecargas, subcargas e ociosidades e, conseqüentemente, custos da operação.

Em PCP existem três níveis hierárquicos que caracterizam as tarefas exercidas pelo setor. No nível estratégico definem-se as estratégias da empresa em um período de longo prazo. Neste, é elaborado o Planejamento Estratégico da Produção. Já no nível tático, o planejamento é de médio prazo e nele é desenvolvido o Planejamento Mestre da Produção. Por último, no nível operacional a estruturação é de curto prazo e é desenvolvida a Programação da Produção.

A respeito do nível operacional, a Programação da Produção é responsável por administrar estoques, sequenciar a produção e implementar e emitir as ordens. Segundo Tubino (2017, p. 102), a Programação da Produção está encarregada de definir quanto e quando comprar, bem como fabricar ou montar cada item necessário à composição dos produtos acabados propostos pelo plano. Isto é, tal nível deve fazer com que as necessidades operacionais da empresa sejam supridas de forma a mitigar atrasos de entrega, falta ou excesso de recursos, gargalos etc. através de um planejamento prévio sobre como as atividades devem ocorrer num contexto diário.

Sequenciar uma linha de produção é crucial para que os resultados ocorram conforme planejado. Num contexto em que sejam manufaturados produtos variados, ordenar a produção é uma das peças-chave na otimização do processo. Para tanto, existe a atividade de Planejamento Avançado da Produção ou *Advanced Planning & Scheduling* (APS). Nela, há regras e métodos de sequenciamento que retornam uma solução otimizada para uma linha de produção. Segundo Pinedo (2016, p. 1) *Scheduling* é um processo de tomada de decisão que trata da alocação de recursos com tempo determinado e sua meta é otimizar um ou mais objetivos.

Apesar da sua importância, o APS não é um recurso tão utilizado pelas empresas para tomadas de decisão e, portanto, o foco deste trabalho é quantificar

estatisticamente os ganhos produtivos em se utilizar o APS. Para tanto, foram elaborados algoritmos computacionais que sequenciam ordens de produção e geram resultados. Desta forma foram colhidas amostras de sequencias aleatórias em diferentes cenários para encontrar o intervalo de confiança das médias para cada resultado de desempenho das regras e métodos. Também foram simuladas ordens de produção para que seja possível identificar na prática os ganhos possíveis com a implementação do APS em linhas de produção.

Os objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são caracterizadas por ações de apelo global que buscam por diminuir desigualdades, proteger o meio ambiente garantir a paz e prosperidade. A ODS utilizada no trabalho é “Indústria, Inovação e Infraestrutura” por conta de contribuir com conhecimentos científicos e no desenvolvimento tecnológico.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem por objetivo apresentar as ferramentas e conceitos utilizados na elaboração do trabalho bem como a justificativa de suas escolhas.

2.1 Planejamento e Controle da Produção

Planejamento e Controle da Produção (PCP) é o setor nas empresas responsável por garantir a eficácia e eficiência de um sistema produtivo de modo a respeitar os recursos e atender à demanda. Para Guerrini (2018, p. 7) “As atividades do PCP dizem respeito a identificar os sistemas de produção, prever vendas, planejar recursos, administrar estoques e programar atividades.”

De acordo com Tubino (2017, p. 4) um setor de PCP tem ligação direta e indireta com outras áreas da empresa. Tal ligação ocorre por conta de sua função depender de dados advindos de outras áreas e as tomadas de decisão construídas pelo PCP trilharem o caminho da empresa como um todo. Informações como *Lead Time*, previsões de vendas, entrada e saída de materiais em estoque e fluxo de caixa são cruciais para a elaboração dos planejamentos em PCP.

Um setor de PCP divide suas atividades em três níveis hierárquicos, sendo eles:

Nível Estratégico - Planejamento Estratégico da Produção: Neste nível, o foco é no longo prazo e nele é desenvolvido o Plano de Produção. A elaboração deste segundo Tubino (2017, p. 3) tem por função adequar os recursos produtivos à demanda prevista de modo a atingir critérios de desempenho. Além disso, o Plano de Produção não é tão detalhado e apenas trabalha com famílias dos produtos.

Nível Tático – Planejamento-mestre da Produção: Nesta etapa o planejamento é de médio prazo e nela o Plano-mestre de Produção (PMP) é desenvolvido. Aqui são definidas as quantidades a serem produzidas, recursos necessários e datas de entrega aos clientes. Isto é, neste nível, os cálculos incluem mais variáveis quando comparados ao nível acima e, uma vez criado, Tubino (2017, p. 4) “o sistema produtivo passa a assumir compromissos de fabricação e montagem dos bens ou serviços”.

Nível Operacional - Programação da Produção: Aqui decidem-se as quantidades a serem compradas e as datas para as compras. Nesta etapa existem três funções as quais são:

Administração dos estoques: Nesta fase, ocorre o controle dos estoques disponíveis, sendo nele estabelecidos os números de reposição, estoque mínimo, de segurança etc.

Sequenciamento: Aqui ocorre a ordenação da linha de produção levando em consideração os recursos disponíveis, datas de entrega, tempos de processamento etc.

Emissão e liberação de ordens: Nesta etapa são emitidas as documentações para que as operações tenham início e são liberadas quando os recursos estiverem disponíveis

2.2 Advanced planning & scheduling

Advanced Planning Scheduling ou APS é uma das ramificações da Programação da Produção, sendo responsável por sequenciar uma linha a partir de algoritmos matemáticos. Segundo Lage (2018, p.176) “O APS é a atividade do PCP em que se aloca, ordena e programa as tarefas necessárias para cumprir as ordens dos clientes nas datas prometidas”. Isto é, a partir de dados fornecidos como recursos disponíveis, datas de entrega e tempo de processamento, o sequenciamento irá determinar uma solução que garanta a eficácia da linha de acordo com o objetivo do usuário.

Os algoritmos do APS utilizam dados quantitativos, isto é, se atêm a dados matemáticos para elaborar a sequência. Existem tipos variados de algoritmos utilizados e a escolha do melhor varia de acordo com o objetivo a ser alcançado.

A seguir, Tubino trata de como os dados entram no APS em tempo real a partir de um sistema que conecta os processos e dados da empresa, sendo assim possível que a ordenação das tarefas seja refeita sempre que uma nova demanda é incluída no modelo. Isso faz com que o APS seja dinâmico, ou seja, tenha capacidade de se moldar conforme mudanças, as quais são recorrentes em um contexto real.

Os APS estarão ligados ao sistema de planejamento das necessidades de materiais (MRP), que se encarrega de obter a lista dos itens, com as respectivas quantidades, que entraram no momento de ação e necessitam ser sequenciados, emitidos e liberados. De posse dessa lista, o APS gera a sequência de produção para o setor aplicando regras pré-formatadas. (TUBINO, 2017, p.183).

Apesar do foco em linhas de produção, o APS pode ser utilizado em diferentes contextos em que há necessidade de organizar tarefas a serem executadas em um período finito. Pinedo (2016, p. 1) diz que o APS pode ser utilizado de maneiras diversas em uma organização e exemplifica que as tarefas e os recursos podem ser utilizados em um aeroporto, construção civil, processos computacionais, entre outros.

Para o entendimento dos tópicos a seguir, serão introduzidos alguns dos termos utilizados em APS:

- j = tarefa.
- i = máquina.
- p_{ij} = tempo de processamento da tarefa j na máquina i .
- p_j = tempo de processamento da tarefa j .
- d_j = data de entrega da tarefa j .
- *Makespan Time* (C_{max}) = tempo de conclusão das tarefas no sistema.
- Atraso Máximo (L_{max}) = tarefa com maior atraso no sistema.
- *Earliness médio* = média das tarefas concluídas antes do prazo de entrega.
- *Tardiness médio* = média das tarefas concluídas após o prazo de entrega.
- Fluxo médio = média dos tempos de finalização das tarefas nas máquinas.

2.2.2 Tipos de modelo em APS

Para que seja feito o sequenciamento de uma linha, deve-se levar em consideração as características dela. Para cada tipo de ambiente, existem diferentes formas de encontrar a resolução dos problemas.

Modelo de máquina única:

Este tipo de modelo é o mais simples de solucionar devido ao sistema conter apenas uma máquina para diferentes tarefas a serem executadas. Apesar de sua simplicidade, modelos de máquina única são a base para modelos de máquinas em série e em paralelo. Segundo Pinedo (2016, p. 33), os resultados obtidos por modelos de máquina única entregam, além dos resultados, a base para as heurísticas que são aplicáveis em modelos mais complexos.

Modelos de máquinas em paralelo:

São modelos com mais de uma máquina. Para a implementação do sequenciamento, é considerado também o balanceamento entre as máquinas para que não haja excesso de tarefas em determinadas máquinas e níveis preocupantes de ociosidade em outras.

Os modelos podem ser de *Flow Shop*, *Job Shop* e *Open Shop*. Em *Flow Shop* as tarefas seguem a mesma rota, isto é, passam pelas mesmas máquinas. Em *Job Shop*, cada tarefa tem sua própria rota e elas podem passar por uma mesma máquina mais de uma vez. Em *Open Shop* cada tarefa, necessariamente, é processada novamente em todas as máquinas.

2.3 Regras e métodos em APS

Para a elaboração das sequências de uma linha, há regras e métodos heurísticos, isto é, modelos matemáticos que recebem parâmetros e objetivos para atingir uma solução ótima para a resolução do problema. Dentre os objetivos estão a mitigação de tarefas em atraso, redução do *makespan time*, redução do fluxo médio e minimização do atraso máximo.

Para resolver problemas de máquina única utilizam-se regras de sequenciamento. Dentre as regras estão:

- FIFO (*First In First Out*): Ordenação gerada a partir da primeira tarefa que entrar no sistema até a última.
- SPT (*Shortest Processing Time*): Ordenação criada a partir da tarefa com menor tempo de processamento (p_j). Objetivo: Minimização do Fluxo Médio.
- EDD (*Earliest Due Date*): Sequência gerada a partir da tarefa com prazo de entrega mais próximo (d_j). Objetivo: Diminuição do atraso máximo.
- STR (*Slack Time Remaining*): A sequência é ordenada a partir do menor valor dado pela subtração da data de entrega e tempo de processamento ($d_j - p_j$).
- CRR (*Critical Ratio Rule*): A sequência é criada a partir do menor valor dado pela razão entre data de entrega e tempo de processamento (d_j / p_j).

Para casos em que as tarefas passam por duas ou mais máquinas, utilizam-se métodos heurísticos para encontrar soluções ótimas, sendo que neste trabalho foram utilizados os métodos de Johnson para duas máquinas, em que todas as tarefas passam por elas e NEH, o qual abrange quantidades de máquinas determinadas pelo usuário e as tarefas passam por todas elas. Tais métodos são algoritmos robustos que garantem um tempo de conclusão total do sistema menor.

2.4 Algoritmos de programação

Para Banin (2018, p.15) “Um algoritmo é uma sequência bem definida e ordenada de passos necessários à solução de algum problema”. Ribeiro (2019, p. 41) completa que “a partir de alguma entrada de informações, um algoritmo deve processar essas informações e, em um tempo finito, fornecer uma saída como solução de algum problema.”

No contexto computacional, algoritmos são criados em linguagens de programação, as quais dispõem de sintaxes e semânticas que viabilizam a construção

da lógica. Uma vez que o código é compilado e convertido em linguagem de máquina, o processador retorna a resposta desejada.

As linguagens de programação possuem ferramentas que norteiam a linha de raciocínio que o programador deve ter para desenvolver códigos. As ferramentas são vastas e variam de linguagem para linguagem. Deste modo, tem-se em mente que os mesmos problemas podem ser resolvidos a partir de diferentes soluções.

2.4.1 *Python*

Python é uma linguagem de programação de código aberto criada no final da década de 1980 por Guido van Rossum. Perkovic (2016, p.8) destaca a importância de *Python* por conta de suas aplicações e ferramentas e explica alguns dos motivos pelos quais usuários a têm escolhido para programar especialmente em projetos relacionados a análise e ciência de dados, *machine learning*, e desenvolvimento web.

Python é uma linguagem de uso geral, projetada especificamente para tornar os programas bastante legíveis. Python também possui uma rica biblioteca, tornando possível criar aplicações sofisticadas usando código de aparência relativamente simples. Por esses motivos, Python tornou-se uma linguagem de desenvolvimento de aplicações popular e também uma preferência como “primeira” linguagem de programação. (PERKOVIC 2016, p. 8).

2.4.2 Variáveis

Variáveis armazenam dados a serem utilizados pelo computador. Celes (2016, p. 21) representa uma variável como um espaço na memória do computador para armazenar determinado tipo de dado. Além disso, variáveis são capazes de armazenar dados que podem ser alterados ao longo do programa, o que dinamiza o código.

2.4.3 Funções

São blocos de instruções independentes que desempenham dada função e podem ser utilizadas assim que chamadas ao longo do código principal quantas vezes

necessário. As funções podem ou não receber parâmetros, os quais são variáveis fornecidas pelo usuário que influenciarão no resultado da função.

Um exemplo é a função soma, a qual recebe parâmetros que são os valores a serem somados. A função efetua o cálculo da soma no bloco de instrução e retorna o resultado ao usuário.

2.4.4 Tipos de dados

Dados são informações a serem processadas pelo computador. Os dados possuem tipos, os quais determinam os espaços que os dados utilizarão da memória e o que pode ser feito com eles no código. A escolha dos tipos corretos à aplicação garante a otimização do processamento do computador.

Os principais tipos de dados, denominados tipos primitivos são os inteiros, reais, cadeia de caracteres e lógicos.

2.4.5 Estrutura de dados

Estrutura de dados é a forma de organizar dados na memória do computador. A escolha da estrutura correta é determinante no que diz respeito à potencialização do processamento computacional uma vez o computador utiliza dados a todo momento para desempenhar funções.

Cury, Barreto e Saraiva (2018, p. 21) destacam a importância das estruturas de dados ao dizerem que “auxiliam na representação e na abstração de estruturas mais complexas, executando operações de armazenamento e busca de dados na memória, de maneira mais sofisticada e robusta” e “as estruturas de dados envolvem o armazenamento de dados organizados na memória de uma maneira mais sofisticada do que pela utilização de variáveis básicas usadas em algoritmos simples”.

2.4.6 Listas em *Python*

Listas são estruturas de dados que recebem e alocam dados que podem ser de tipos diferentes. Por serem mutáveis, as listas possibilitam ao desenvolvedor

adicionar, excluir, reordenar e alterar dados. As manipulações de uma lista podem ser feitas utilizando índices para acessar os dados ou mesmo chamando pelo nome destes como corrobora Lambert (2022, p. 236) ao afirmar que Python, poderá discernir duas categorias amplas de operações, que são chamadas de operações baseadas em índice e operações baseadas em conteúdo.

2.5 Simulação de eventos discretos

A simulação de eventos discretos caracteriza-se por um cenário em que eventos alteram o estado de um sistema. Um ambiente de simulação é capaz de recriar situações com grande nível de proximidade a realidade e ali podem ser testadas diferentes estratégias de modo a chegar no resultado esperado sem perdas.

A simulação viabiliza que testes ocorram em um sistema sem que seja necessário realocar toda uma linha de produção para testar diferentes situações. Com a utilização de distribuições estatísticas, variáveis e lógicas, a simulação torna-se uma peça-chave para determinar quanto produzir, com quais recursos e de que forma os arranjar na linha.

FlexSim é um *software* de simulação 2D e 3D utilizado para desenvolver sistemas variados sendo capaz de incluir variáveis relacionadas a distância e movimentação de entidades e recursos, tempos de processamento e *setup* em tipos variados de distribuições matemáticas, tipos de chegada, lógica para as rotas etc. Além disso, o *FlexSim* é capaz de simular casos de programação dinâmica, isto é, conforme os eventos ocorrem no ambiente, novas variáveis ou lógicas entram no processo.

Para os resultados da simulação no *FlexSim*, o usuário tem a opção de criar gráficos dinâmicos que demonstram ao longo do tempo quais são os níveis de ociosidade e utilização das máquinas, quantidades percorridas pelos funcionários, entrada e expedição de material, entre outros. Tudo isso permite que a análise seja feita com clareza, sendo possível identificar os pontos de melhoria.

2.6 Estatística

Para Vieira (2018, p. 1) “A palavra Estatística está associada à ideia de “coleção de números”. Entretanto, números não são coletados apenas para serem armazenados: eles servem para a tomada de decisão”. Neto (2006, p. 14) então explica a Estatística como “a ciência que se preocupa com a organização, descrição, análise e interpretação dos dados experimentais, visando a tomada de decisões”.

A estatística é uma ciência dentro do campo da matemática capaz disponibilizar aplicações em qualquer tipo de contexto em que haja dados. Desta forma, análises e decisões passam a ser mais corretas, admitindo sempre, entretanto, incertezas.

2.6.1 Estatística Inferencial

A Estatística Inferencial auxilia na comprovação ou rejeição de hipóteses baseadas nos dados coletados, sendo possível tirar conclusões sobre o objeto de estudo a partir da análise e interpretação de dados. “É a parte da Estatística que tem o objetivo de estabelecer níveis de confiança da tomada de decisão de associar uma estimativa amostral a um parâmetro populacional de interesse” Costa (2012, p. 87).

2.6.2 Distribuição Normal ou Gaussiana

É um modelo de distribuição contínua de probabilidade que apresenta a chance de um evento ocorrer, sendo a probabilidade a área do intervalo da curva. Sua distribuição tem os dois lados idênticos e no meio dela se encontram a média, moda e mediana.

Casella e Berger (2018, p. 92) destacam a importância para a distribuição normal ao afirmarem que seu formato de sino a transforma em uma escolha atrativa para muitos modelos de populações e pode ser utilizada para aproximar uma grande variedade de distribuições em grandes amostras.

2.6.3 População e Amostra

População trata-se de todos os elementos de um conjunto de dados. Já amostra é obtida a partir da coleta de subconjuntos da população.

2.6.4 Intervalo de Confiança

Trata-se de uma ferramenta estatística que estima o intervalo em que se encontra determinado parâmetro da população. Para que se encontre o intervalo, é necessário definir o coeficiente de confiança $1 - \alpha$, o qual, segundo Werkema (2014, p. 38) “representa a probabilidade, antes da extração da amostra aleatória, da obtenção de um intervalo de confiança correto”.

Quanto maior o valor escolhido para o coeficiente de confiança, maior o intervalo do parâmetro e maior a certeza. Portanto, o coeficiente de confiança escolhido deve garantir que o intervalo tenha alto grau de certeza, mas que não seja muito grande, uma vez que as tomadas de decisão serão dificultadas. Os valores mais usuais são de 0,90, 0,95 e 0,99.

2.6.5 Média amostral

Média é uma medida estatística dada pela soma dos termos de um conjunto de valores dividido pela quantidade de termos do conjunto. Devido à média amostral trabalhar com dados amostrais e não populacionais, ela contém incertezas. Portanto, a média é calculada considerando seu intervalo de confiança.

A fórmula para média amostral em que o desvio padrão populacional é desconhecido e que o tamanho da amostra seja maior que 30 é:

O Teorema Central do Limite afirma que a média amostral coletada de uma população que não tenha distribuição normal, se aproxima da normal. Werkema (2014, p. 20) continua dizendo que “para a utilização do Teorema Central do Limite, é usual considerar que o tamanho n da amostra é suficientemente grande quando n é superior a 30”. Este teorema justifica a fórmula e em especial, a aparição do termo $z_{\alpha/2}$ nela, uma vez que esta sigla está associada a tabela z , a qual possui valores que facilitam o cálculo da probabilidade de um evento ocorrer na distribuição normal sem necessidade da resolução de integrais em funções.

2.6.6 Desvio padrão amostral

Medida de dispersão dos valores de um conjunto em relação a sua média amostral.

2.6.7 Desvio percentual

Medida que representa o quanto um valor de um conjunto de dados se desvia da média em porcentagem.

2.7 Justificativa

Apesar dos estudos desenvolvidos em APS e softwares existentes, muitas empresas não sequenciam suas linhas de produção por desconhecimento ou por não compreenderem os ganhos e otimizações que o APS é capaz de fornecer. Portanto, o trabalho busca mostrar quantitativamente tais ganhos buscando disseminar o conhecimento e incentivar as empresas a implementarem sequenciamentos mais robustos em suas linhas.

A junção da estatística e algoritmos computacionais para este trabalho garantem que os dados sejam trabalhados de forma eficiente e rápida e tragam resultados que se baseiem na realidade uma vez que são ferramentas completas com alto grau de processamento, no caso dos algoritmos, e precisão, no caso da estatística.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho é dividido em três etapas, sendo a primeira delas a elaboração de algoritmos de APS e resultados de desempenho utilizando *Python*. A segunda etapa é utilizar conceitos de Estatística Inferencial para, em *Python*, colher amostras de sequencias de produção aleatórias, reordená-las a partir dos algoritmos de APS e calcular as médias dos resultados de desempenho das regras e métodos em diferentes cenários. Para a última etapa, é utilizado o *software FlexSim* para simular cenários e compreender como as regras e métodos se comportam na prática.

3.1 Algoritmos das regras

Para a primeira etapa, são criados algoritmos de sequenciamento e seus resultados utilizando a linguagem de programação *Python*, na sua versão 3.10 (64-BIT). Todos os códigos são desenvolvidos no ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) *Pycharm*.

Os algoritmos são feitos de forma estruturada, isto é, o código é compilado linha a linha. A obtenção e ordenação dos dados são realizadas pela estrutura de dados denominada lista por conta da sua capacidade de manipular dados. Todos os métodos, regras e resultados utilizados são feitos dentro de funções e são invocados pelo código principal.

Função *fifo*:

- Parâmetros: lista com tempos de processamento *pj* e lista com datas de entrega *dj*.
- Instrução: Não efetua reordenação.
- Retorno: listas *pj* e *dj*.

Função *edd*:

- Parâmetros: lista com tempos de processamento pj e lista com datas de entrega dj.
- Instrução: As listas pj e dj são ordenadas a partir da data de entrega mais próxima.
- Retorno: listas pj e dj reordenadas.

Função spt:

- Parâmetros: lista com tempos de processamento pj e lista com datas de entrega dj.
- Instrução: As listas pj e dj são ordenadas a partir do menor tempo de processamento.
- Retorno: listas pj e dj reordenadas.

Função str1:

- Parâmetros: lista com tempos de processamento pj e lista com datas de entrega dj.
- Instrução: Cria uma lista auxiliar composta pelos resultados das subtrações entre data de entrega e tempo de processamento dos respectivos itens das listas dj e pj. Então, o algoritmo reordena todas as listas a partir do menor valor da lista auxiliar.
- Retorno: listas pj e dj reordenadas.

Função crr:

- Parâmetros: lista com tempos de processamento pj e lista com datas de entrega dj.
- Instrução: Cria uma lista auxiliar composta pelos resultados das divisões entre data de entrega e tempo de processamento dos respectivos itens das listas dj e pj. Por fim, o algoritmo reordena todas as listas a partir do menor valor da lista auxiliar.

- Retorno: listas p_j e d_j reordenadas.

3.2 Algoritmos dos métodos

Os métodos não utilizam datas de entrega como parâmetro para gerar sequências de produção e, portanto, estes dados não são considerados.

Função *neh*

- Parâmetro: lista com tempos de processamento p_j .
- Instrução: Primeiramente, é gerada uma lista que armazena as somas dos tempos de processamento de cada tarefa nas máquinas. A partir daí, o programa armazena os dois maiores itens da lista em uma lista final, calcula o *makespan time* do sistema em dois cenários e escolhe o menor entre os dois casos. Exemplo: $[A, B] = 30$ dias e $[B, A] = 27$ dias. Neste caso, $[B, A]$ é selecionado. Assim, o terceiro maior item da lista das somas de tempo de processamento é incluído à lista final e são calculados três novos casos, sendo a inserção deste último item antes, entre e depois dos demais. Exemplo, $[B, A, C] = 48$ dias, $[B, C, A] = 52$ dias e $[C, B, A] = 56$ dias. Assim, a sequência escolhida é $[B, C, A]$ por ter o menor *makespan*. Este processo se repete até que todas as tarefas sejam incluídas.
- Retorno: lista p_j reordenada.

Função *johnson*

- Parâmetro: lista com tempos de processamento p_j .
- Instrução: O algoritmo seleciona o menor item da lista de tempos de processamento das tarefas j nas máquinas i . Caso o item selecionado seja processado na máquina 1, a tarefa vai para a primeira posição. Já se o item estiver na máquina 2, a tarefa vai para a última posição. Em caso de empate, a tarefa da máquina 1 é escolhida. O processo é repetido para as demais posições até que todas as tarefas sejam sequenciadas.

- Retorno: lista pj reordenada.

3.3 Algoritmos dos resultados de desempenho

Os resultados de desempenho também são gerados dentro de funções, sendo eles: fluxo médio, *makespan*, atraso máximo, *earliness* médio, *tardiness* médio e número de tarefas em atraso. As funções recebem como parâmetro as listas que foram reordenadas pelos algoritmos das regras e dos métodos e o retorno delas são os resultados em unidades de tempo, com exceção para número de tarefas em atraso que é dado por unidades. Os resultados dos métodos são apenas *makespan* e fluxo médio por não levarem em consideração as datas de entrega.

3.4 Elaboração estatística

A segunda etapa do trabalho é quantificar estatisticamente o desempenho dos resultados das regras e métodos em *Python* em diferentes cenários. Para isso, foram desenvolvidas novas funções que colhem amostras de ordens de produção e, para gerá-las, o programa cria listas de tarefas com tempos de processamento e datas de entrega, cujos valores são aleatórios e estão dentro de um intervalo com limites inferior e superior estabelecidos na função *randint()* da biblioteca *random*. Após isso, as funções das regras e métodos de APS reordenam todas as listas da amostra e entregam seus resultados de desempenho. Para visualização, o código entrega tabelas com as médias e margens de erro de todos os resultados de todas as regras e métodos. As tabelas de desvio percentual foram feitas manualmente e demonstram o desvio dos demais resultados em relação ao melhor deles.

Os cálculos estatísticos foram feitos a partir da equação de média amostral de uma população. O nível de confiança escolhido foi de 95% por ser uma porcentagem equilibrada. O tamanho da amostra foi de 1000 listas. A escolha do número se deve ao fato de este não exigir excessivamente do processamento do computador e por apresentar margens de variação baixas quando comparadas a tamanhos de amostra maiores. A quantidade de tarefas é de 10. Deste modo, o código calcula as médias e desvios padrões de todos os resultados de todas as regras e métodos e depois utiliza

a equação de média amostral para entregar as médias e margens de erro na saída do programa.

As amostras são diferentes para cada tipo de cenário e para quantidades de máquina. As regras utilizadas são FIFO, SPT, EDD, STR e CRR e são feitos 5 cenários diferentes para tarefas em uma máquina, sendo que os limites de variação das datas de entrega diferem em cada um deles. Para 2 máquinas, os métodos utilizados são Johnson, NEH e FIFO e são criados 6 cenários diferentes com variações nos limites de tempos de processamento. Por último, para 5 máquinas, são feitos 5 cenários para NEH e FIFO, com variações nos limites de tempos de processamento.

As tabelas de cenários foram criadas de modo a englobar situações variadas e verificar o desempenho das regras em cada uma delas. Os limites inferior e superior representam a delimitação usada para que números aleatórios sejam gerados pelo código. As tabelas 1, 2 e 3 apresentam a formulação dos cenários:

Tabela 1 - Cenários das regras

Cenário	Limite inferior pj	Limite superior pj	Limite inferior dj	Limite superior dj
1	1	10	1	20
2	1	10	1	40
3	1	10	1	60
4	1	10	1	80
5	1	10	1	100

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Cenários dos métodos para 2 máquinas

Cenário	Limite inferior pj	Limite superior pj
1	1	10
2	1	20
3	1	40
4	1	60
5	1	80
6	1	100

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 - Cenários dos métodos para 5 máquinas

Cenário	Limite inferior pj	Limite superior pj
1	1	20
2	1	40
3	1	60
4	1	80
5	1	100

Fonte: Autoria própria.

3.5 Simulação

Para a terceira etapa, apenas os cenários dos métodos foram simulados, uma vez que as regras são feitas apenas para 1 máquina e, portanto, a simulação delas não agrega valor a análise.

Para gerar as ordens de produção a serem simuladas, o código em *Python* percorre as amostras e identifica as sequências de todos os métodos cujos resultados mais se aproximam das médias obtidas em cada cenário. Assim é possível fazer as simulações e entender como os resultados de desempenho são interpretados na prática.

No *Flexsim* versão 2022, todas as tarefas chegam ao mesmo tempo na entrada (*input*) já com sequenciamento e tempos de processamento definidos. Após isso, seguem para uma fila (*queue*), onde esperam para que sejam processadas. Cada máquina possui um estoque intermediário para manter a fluidez do processo. Uma vez percorrida em todas as máquinas, a tarefa é enviada à saída (*sink*).

Para resultados gráficos, a simulação determina a utilização e ociosidade das máquinas (*State bar*) e tempo médio em estoque (*Average Content*).

4 RESULTADOS

Para os resultados estatísticos, menores valores significam melhores desempenhos. As tabelas de médias de resultado apresentam quais regras se destacam para cada tipo de resultado. As tabelas de desvio percentual auxiliam na interpretação das médias uma vez que as porcentagens dos desvios percentuais se referem as distâncias das médias em relação à melhor média.

4.1 Resultados estatísticos das regras

Fluxo Médio: SPT obteve os melhores resultados em todos os cenários para Fluxo Médio. EDD alcança o segundo lugar seguido de FIFO e STR com resultados aproximados. CRR se manteve na última colocação em todos os cenários.

Atraso Máximo: EDD obteve o melhor resultado em todos os cenários, com destaque para cenários em que as datas de entrega são maiores. STR esteve próximo ao EDD em todos os cenários, tendo seu maior desvio percentual em 30%, o que é baixo em relação as demais regras. CRR e SPT disputam a terceira colocação, porém sem bons resultados. CRR tem vantagem considerável em situações que as datas de entrega são maiores, porém SPT vence CRR em situações com datas de entrega curtas. FIFO se manteve na última colocação em todos os cenários, obtendo resultados com médias em até 25 dias de atraso máximo a mais do que EDD.

Earliness: SPT obteve o melhor resultado, seguido de FIFO. As demais regras tiveram resultados semelhantes, sendo a ordem EDD, STR e CRR.

Tardiness: Em cenários com datas de entrega mais curtas, SPT obteve o melhor resultado, seguido de EDD, STR, FIFO e CRR, respectivamente, sem desvios percentuais elevados. Já em cenários com datas de entrega maiores, EDD se encontra na primeira colocação seguido de STR com desvios percentuais baixos, seguido de CRR, SPT e FIFO, respectivamente, com desvios altos.

Tarefas em atraso: Em cenários com datas de entrega mais curtas, SPT obteve o melhor resultado, seguido de FIFO, EDD, STR e CRR, respectivamente, sem desvios percentuais elevados. Já em cenários com datas de entrega maiores, EDD se

encontra na primeira colocação seguido de STR com desvios percentuais baixos, CRR, SPT e FIFO, respectivamente, com desvios altos.

Para diminuir o atraso máximo, as regras EDD, STR e CRR, porém esta última com pior performance, buscam por balancear *earliness* e *tardiness*, o que resulta em mais tarefas em atraso. Entretanto, conforme as datas de entrega aumentam em relação aos tempos de processamento, essas regras são capazes de minimizar também o número de tarefas em atraso.

As tabelas 4 a 13 apresentam os resultados estatísticos das regras para os 5 cenários programados. Em negrito estão os resultados vencedores.

Tabela 4 - Médias para 1 máquina. Cenário 1

Regra/Resultado	Fluxo Médio	Atraso Máximo	<i>Earliness</i>	<i>Tardiness</i>	Tarefas em atraso
FIFO	30,32 ± 0,35	42,68 ± 0,59	-1,27 ± 0,05	18,38 ± 0,32	7,86 ± 0,06
SPT	22,9 ± 0,33	40,02 ± 0,61	-2,75 ± 0,07	12,44 ± 0,27	6,12 ± 0,07
EDD	28,18 ± 0,35	36,06 ± 0,58	-0,53 ± 0,03	15,5 ± 0,31	7,91 ± 0,06
CRR	35,83 ± 0,32	42,64 ± 0,58	-0,24 ± 0,01	22,87 ± 0,3	8,85 ± 0,02
STR	32,51 ± 0,35	37,5 ± 0,58	-0,22 ± 0,01	19,53 ± 0,32	8,7 ± 0,04

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Desvios Percentuais para 1 máquina. Cenário 1

Regra/Resultado	Fluxo Médio	Atraso Máximo	<i>Earliness</i>	<i>Tardiness</i>	Tarefas em atraso
FIFO	32,40%	18,36%	-53,82%	47,75%	28,43%
SPT	0,00%	10,98%	0,00%	0,00%	0,00%
EDD	23,06%	0,00%	-80,73%	24,60%	29,25%
CRR	56,46%	18,25%	-91,27%	83,84%	44,61%
STR	41,97%	3,99%	-92,00%	56,99%	42,16%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Médias para 1 máquina. Cenário 2

Regra/Resultado	Fluxo Médio	Atraso			Tarefas em atraso
		Máximo	<i>Earliness</i>	<i>Tardiness</i>	
FIFO	30,17 ± 0,34	36,67 ± 0,65	-5,09 ± 0,14	12,07 ± 0,29	6,04 ± 0,08
SPT	22,7 ± 0,31	32,13 ± 0,69	-8,34 ± 0,18	7,84 ± 0,23	4,42 ± 0,08
EDD	29,25 ± 0,34	18,74 ± 0,54	-1,57 ± 0,1	7,63 ± 0,3	6,4 ± 0,13
CRR	35,26 ± 0,31	33,49 ± 0,61	-1,15 ± 0,07	13,22 ± 0,29	7,55 ± 0,08
STR	31,24 ± 0,34	20,06 ± 0,55	-1,04 ± 0,08	9,09 ± 0,32	7,2 ± 0,12

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Desvios Percentuais para 1 máquina. Cenário 2

Regra/Resultado	Fluxo Médio	Atraso			Tarefas em atraso
		Máximo	<i>Earliness</i>	<i>Tardiness</i>	
FIFO	32,91%	95,68%	-38,97%	58,19%	36,65%
SPT	0,00%	71,45%	0,00%	2,75%	0,00%
EDD	28,85%	0,00%	-81,18%	0,00%	44,80%
CRR	55,33%	78,71%	-86,21%	73,26%	70,81%
STR	37,62%	7,04%	-87,53%	19,13%	62,90%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Médias para 1 máquina. Cenário 3

Regra/Resultado	Fluxo Médio	Atraso			Tarefas em atraso
		Máximo	<i>Earliness</i>	<i>Tardiness</i>	
FIFO	30,49 ± 0,34	32,62 ± 0,73	-10,89 ± 0,25	8,23 ± 0,25	4,4 ± 0,09
SPT	23,06 ± 0,31	26,95 ± 0,75	-15,41 ± 0,29	5,31 ± 0,2	3,17 ± 0,08
EDD	29,89 ± 0,34	6,93 ± 0,42	-5,49 ± 0,28	2,22 ± 0,18	3,1 ± 0,18
CRR	35,37 ± 0,32	26,0 ± 0,65	-4,54 ± 0,2	6,75 ± 0,23	4,96 ± 0,12
STR	31,17 ± 0,34	7,97 ± 0,45	-4,7 ± 0,26	2,71 ± 0,2	3,6 ± 0,18

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 - Desvios Percentuais para 1 máquina. Cenário 3

Regra/Resultado	Fluxo Médio	Atraso			Tarefas em atraso
		Máximo	<i>Earliness</i>	<i>Tardiness</i>	
FIFO	32,22%	370,71%	-29,33%	270,72%	41,94%

SPT	0,00%	288,89%	0,00%	139,19%	2,26%
EDD	29,62%	0,00%	-64,37%	0,00%	0,00%
CRR	53,38%	275,18%	-70,54%	204,05%	60,00%
STR	35,17%	15,01%	-69,50%	22,07%	16,13%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 - Médias para 1 máquina. Cenário 4

Regra/Resultado	Fluxo Médio	Atraso		<i>Earliness</i>	<i>Tardiness</i>	Tarefas em atraso
		Máximo				
FIFO	30,04 ± 0,36	28,45 ± 0,84		-18,95 ± 0,38	5,85 ± 0,23	3,19 ± 0,09
SPT	22,65 ± 0,33	22,27 ± 0,87		-24,18 ± 0,4	3,69 ± 0,18	2,26 ± 0,08
EDD	29,59 ± 0,35	2,26 ± 0,27		-14,07 ± 0,48	0,53 ± 0,08	0,97 ± 0,11
CRR	34,9 ± 0,32	18,56 ± 0,72		-11,7 ± 0,37	3,46 ± 0,17	2,77 ± 0,1
STR	30,58 ± 0,35	2,82 ± 0,3		-13,24 ± 0,47	0,69 ± 0,1	1,19 ± 0,12

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 - Desvios Percentuais para 1 máquina. Cenário 4

Regra/Resultado	Fluxo Médio	Atraso		<i>Earliness</i>	<i>Tardiness</i>	Tarefas em atraso
		Máximo				
FIFO	32,63%	1158,85%		-21,63%	1003,77%	228,87%
SPT	0,00%	885,40%		0,00%	596,23%	132,99%
EDD	30,64%	0,00%		-41,81%	0,00%	0,00%
CRR	54,08%	721,24%		-51,61%	552,83%	185,57%
STR	35,01%	24,78%		-45,24%	30,19%	22,68%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 - Médias para 1 máquina. Cenário 5

Regra/Resultado	Fluxo Médio	Atraso		<i>Earliness</i>	<i>Tardiness</i>	Tarefas em atraso
		Máximo				
FIFO	30,36 ± 0,36	25,45 ± 0,89		-27,49 ± 0,49	4,62 ± 0,21	2,54 ± 0,08
SPT	22,99 ± 0,32	19,78 ± 0,9		-33,19 ± 0,51	2,96 ± 0,16	1,79 ± 0,07
EDD	30,04 ± 0,35	0,88 ± 0,17		-23,36 ± 0,58	0,18 ± 0,05	0,38 ± 0,07
CRR	35,2 ± 0,33	14,29 ± 0,75		-20,17 ± 0,49	2,15 ± 0,13	1,74 ± 0,08
STR	30,83 ± 0,35	1,18 ± 0,19		-22,64 ± 0,57	0,24 ± 0,05	0,48 ± 0,07

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 - Desvios Percentuais para 1 máquina - Cenário 5

Regra/Resultado	Fluxo Médio	Atraso			Tarefas em atraso
		Máximo	<i>Earliness</i>	<i>Tardiness</i>	
FIFO	32,06%	2792,05%	-17,17%	2466,67%	568,42%
SPT	0,00%	2147,73%	0,00%	1544,44%	371,05%
EDD	30,67%	0,00%	-29,62%	0,00%	0,00%
CRR	53,11%	1523,86%	-39,23%	1094,44%	357,89%
STR	34,10%	34,09%	-31,79%	33,33%	26,32%

Fonte: Autoria própria.

4.2 Resultados estatísticos dos métodos para 2 máquinas

Makespan: apesar do NEH e Johnson não entregarem a mesma sequência necessariamente, os resultados de *makespan* foram idênticos em todos os cenários. FIFO obteve os piores resultados em todos os cenários e seu desvio percentual em relação as médias vencedoras se manteve em torno de 12%.

Fluxo médio: Quando há pouca variação nos tempos de processamento, Johnson tem resultados melhores que NEH, porém, conforme os tempos de processamento aumentam, NEH amplia vantagem sobre Johnson de forma linear como apontam os desvios percentuais. FIFO obteve os piores resultados em todos os cenários e a vantagem de NEH sobre FIFO também ocorre linearmente.

As tabelas 14 a 25 apresentam os resultados estatísticos dos métodos para 2 máquinas em 5 cenários programados.

Tabela 14 - Médias para 2 máquinas. Cenário 1

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	61,56 ± 0,48	31,08 ± 0,3
NEH	61,56 ± 0,48	31,91 ± 0,26
FIFO	68,1 ± 0,53	35,1 ± 0,32

Fonte: Autoria própria.

Tabela 15 - Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 1

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	0,00%	0,00%
NEH	0,00%	2,67%
FIFO	10,62%	12,93%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 - Médias para 2 máquinas. Cenário 2

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	117,07 ± 0,98	59,52 ± 0,6
NEH	117,07 ± 0,98	59,24 ± 0,55
FIFO	130,65 ± 1,08	67,15 ± 0,65

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 - Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 2

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	0,00%	0,47%
NEH	0,00%	0,00%
FIFO	11,60%	13,35%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 - Médias para 2 máquinas. Cenário 3

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	229,77 ± 1,89	116,9 ± 1,17
NEH	229,77 ± 1,89	114,13 ± 1,07
FIFO	257,19 ± 2,09	132,49 ± 1,26

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 - Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 3

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	0,00%	2,43%
NEH	0,00%	0,00%
FIFO	11,93%	16,09%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 - Médias para 2 máquinas. Cenário 4

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	344,03 ± 2,76	175,17 ± 1,8
NEH	344,03 ± 2,76	169,93 ± 1,63
FIFO	383,96 ± 3,0	196,73 ± 1,83

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 - Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 4

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	0,00%	3,08%
NEH	0,00%	0,00%
FIFO	11,61%	15,77%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 - Médias para 2 máquinas. Cenário 5

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	449,77 ± 3,8	230,26 ± 2,39
NEH	449,77 ± 3,8	221,86 ± 2,21
FIFO	504,15 ± 4,11	261,38 ± 2,53

Fonte: Autoria própria.

Tabela 23 - Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 5

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	0,00%	3,79%
NEH	0,00%	0,00%
FIFO	12,09%	17,81%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 24 - Médias para 2 máquinas. Cenário 6

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	567,86 ± 4,76	289,92 ± 3,03
NEH	567,87 ± 4,76	279,58 ± 2,78
FIFO	635,9 ± 5,19	326,24 ± 3,1

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25 - Desvios Percentuais para 2 máquinas. Cenário 6

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
JOHNSON	0,00%	3,70%
NEH	0,00%	0,00%
FIFO	11,98%	16,69%

Fonte: Autoria própria.

4.3 Resultados de simulação dos métodos para 2 máquinas

Os gráficos de Processamento e Ociosidade representam a relação percentual entre utilização da máquina e tempo ocioso, isto é, quando a máquina não está executando tarefas. Já os gráficos de tempo médio em estoque representam o tempo médio em que as tarefas aguardam para serem processadas nos estoques das máquinas e a unidade de medida é quantidade de tarefas.

Processamento e Ociosidade: O processamento da segunda máquina é o que tem maior relevância a esse sistema, uma vez que uma menor ociosidade nela garante um *makespan* menor. Johnson e NEH apresentaram porcentagens idênticas em todos os resultados para as duas máquinas, o que corrobora a afirmação dos resultados estatísticos sobre estes métodos trazerem o mesmo *makespan*, ainda que entreguem soluções diferentes. FIFO foi inferior em todos os cenários na segunda máquina.

Tempo médio em estoque: NEH obteve resultados melhores que Johnson, com exceção para o primeiro cenário que possui baixa variação nos tempos de processamento. O primeiro estoque do FIFO foi inferior em todos os cenários.

Resultados de simulação para Johnson, NEH e FIFO nas figuras 1 a 6 em 2 máquinas:

Figura 1 - Simulação para 2 máquinas. Cenário 1

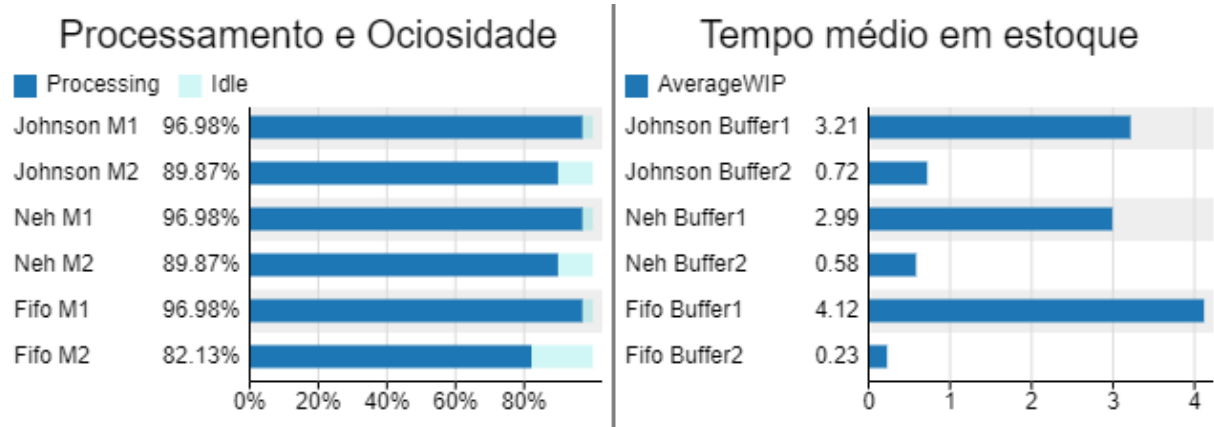


Figura 2 - Simulação para 2 máquinas. Cenário 2

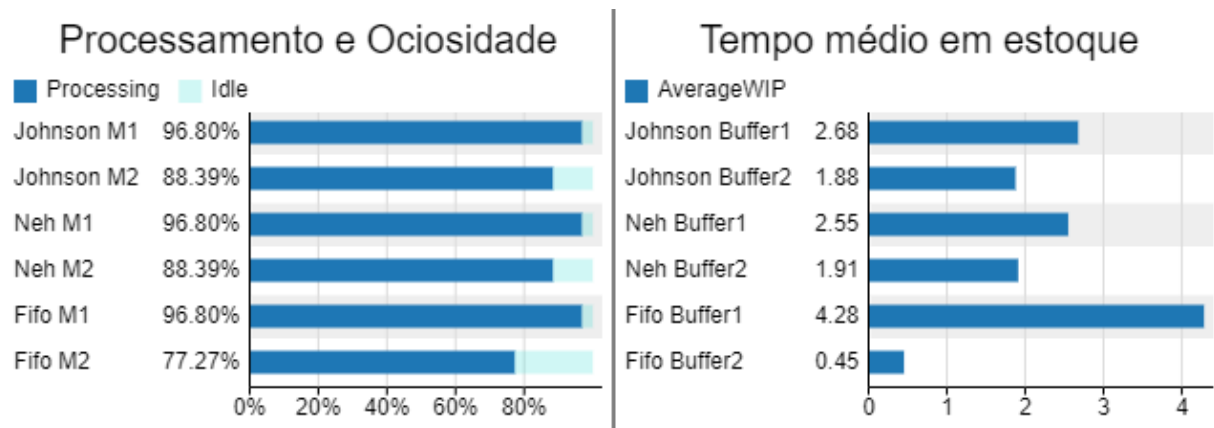


Figura 3 - Simulação para 2 máquinas. Cenário 3

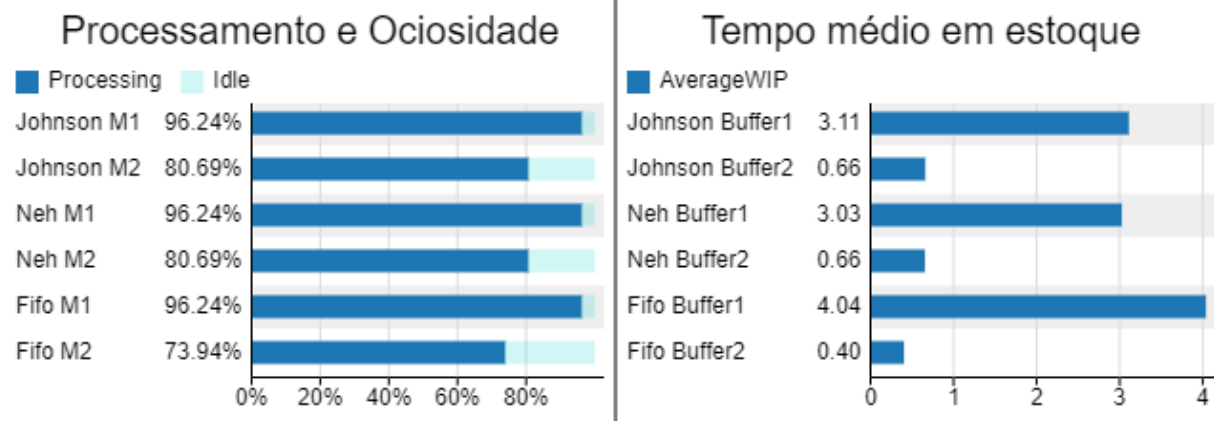


Figura 4 - Simulação para 2 máquinas. Cenário 4

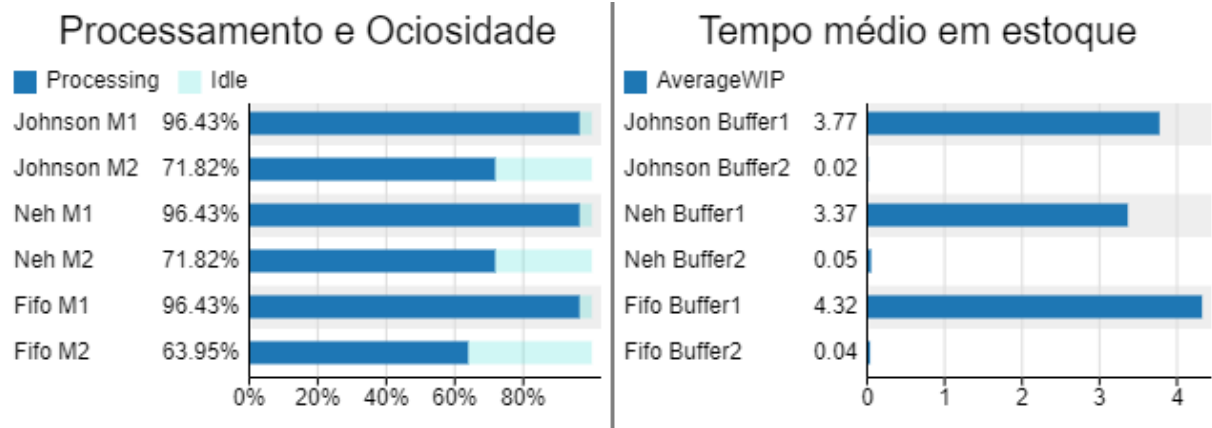


Figura 5 - Simulação para 2 máquinas. Cenário 5

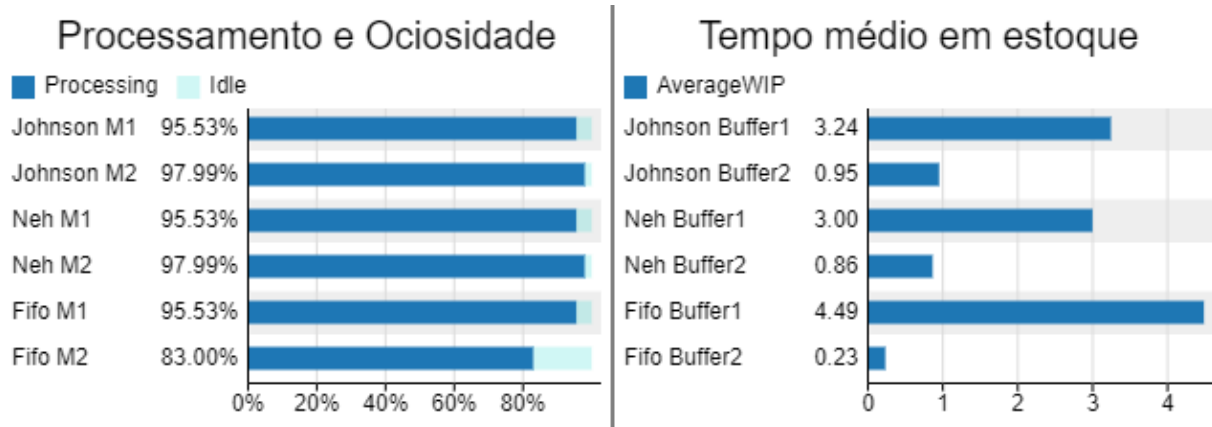
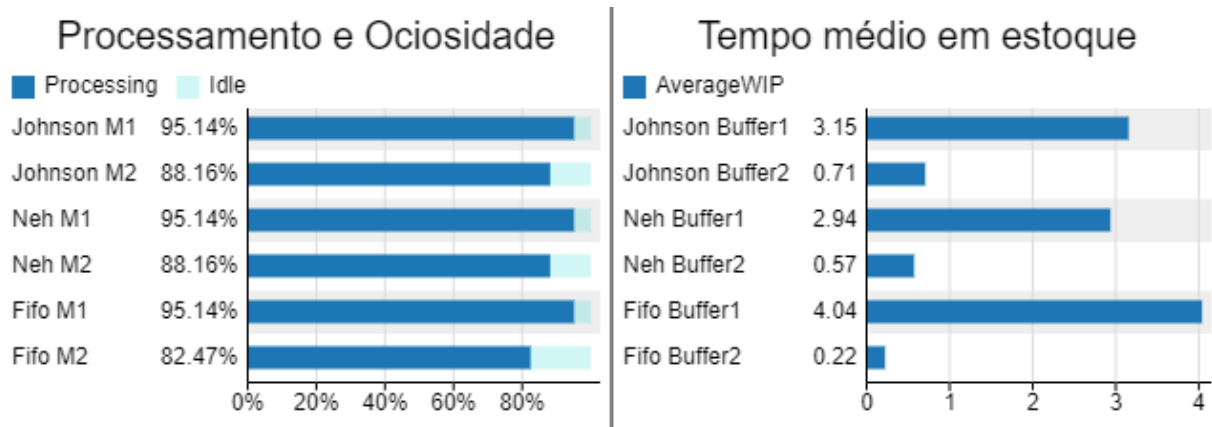


Figura 6 - Simulação para 2 máquinas. Cenário 6



4.4 Resultados estatísticos dos métodos para 5 máquinas

Makespan e Fluxo médio: NEH obteve os melhores resultados em todos os cenários, sendo que os desvios percentuais se mantiveram semelhantes à medida que os tempos de processamento aumentam, sendo os desvios em torno de 16% para *makespan* e 13% para fluxo médio.

As tabelas 26 a 35 demonstram os resultados dos métodos para 5 máquinas em 5 cenários programados.

Tabela 26 - Médias para 5 máquinas. Cenário 1

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
NEH	161,76 ± 0,82	81,83 ± 0,54
FIFO	187,68 ± 1,02	92,33 ± 0,61

Fonte: Autoria própria.

Tabela 27 - Desvios Percentuais para 5 máquinas. Cenário 1

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
NEH	0,00%	0,00%
FIFO	16,02%	12,83%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 28 - Médias para 5 máquinas. Cenário 2

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
NEH	318,24 ± 1,7	160,83 ± 1,09
FIFO	370,63 ± 1,97	182,06 ± 1,17

Fonte: Autoria própria.

Tabela 29 - Desvios Percentuais para 5 máquinas. Cenário 2

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
NEH	0,00%	0,00%
FIFO	16,46%	13,20%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 30 - Médias para 5 máquinas. Cenário 3

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
NEH	471,61 ± 2,45	237,38 ± 1,55
FIFO	549,62 ± 3,07	270,63 ± 1,82

Fonte: Autoria própria.

Tabela 31 - Desvios Percentuais para 5 máquinas. Cenário 3

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
NEH	0,00%	0,00%
FIFO	16,54%	14,01%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 32 - Médias para 5 máquinas. Cenário 4

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
NEH	629,05 ± 3,38	317,19 ± 2,2
FIFO	729,84 ± 3,95	359,9 ± 2,38

Fonte: Autoria própria.

Tabela 33 - Desvios Percentuais para 5 máquinas. Cenário 4

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
NEH	0,00%	0,00%
FIFO	16,02%	13,21%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 34 - Médias para 5 máquinas. Cenário 5

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
NEH	781,97 ± 4,17	396,69 ± 2,67
FIFO	913,89 ± 5,06	449,12 ± 3,0

Fonte: Autoria própria.

Tabela 35 - Desvios Percentuais para 5 máquinas. Cenário 5

Método/Resultado	<i>Makespan</i>	Fluxo Médio
------------------	-----------------	-------------

NEH	0,00%	0,00%
FIFO	16,87%	13,22%

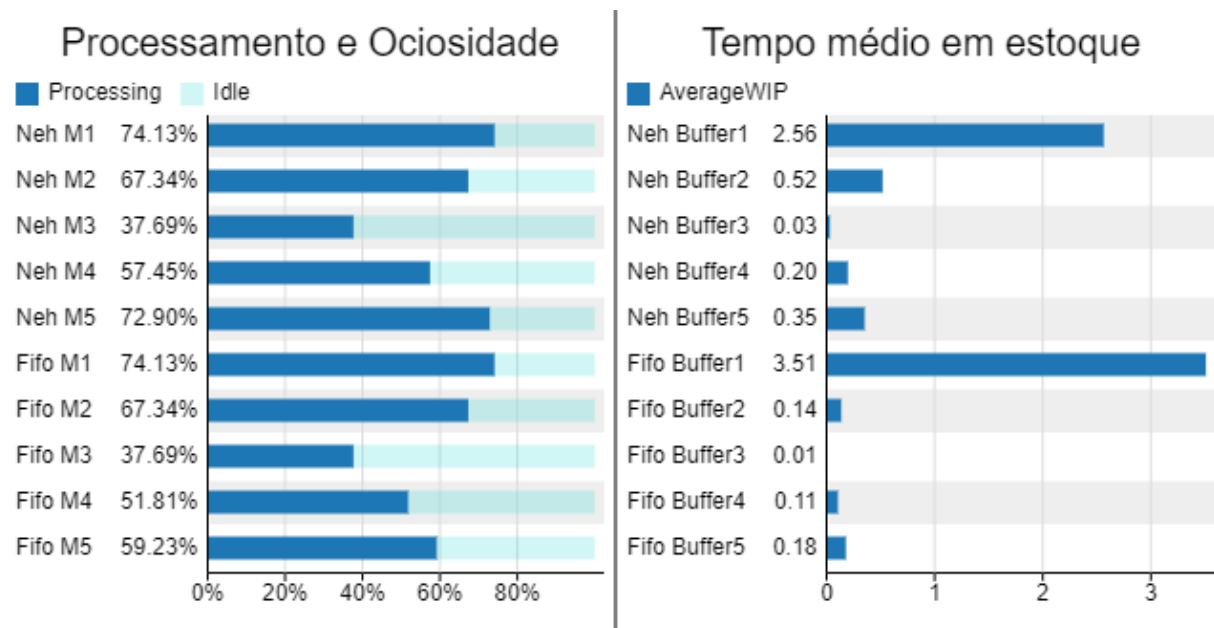
Fonte: Autoria própria.

4.5 Resultados de simulação dos métodos para 5 máquinas

Processamento e Ociosidade: NEH apresentou menor porcentagem de ociosidade nas últimas 2 máquinas.

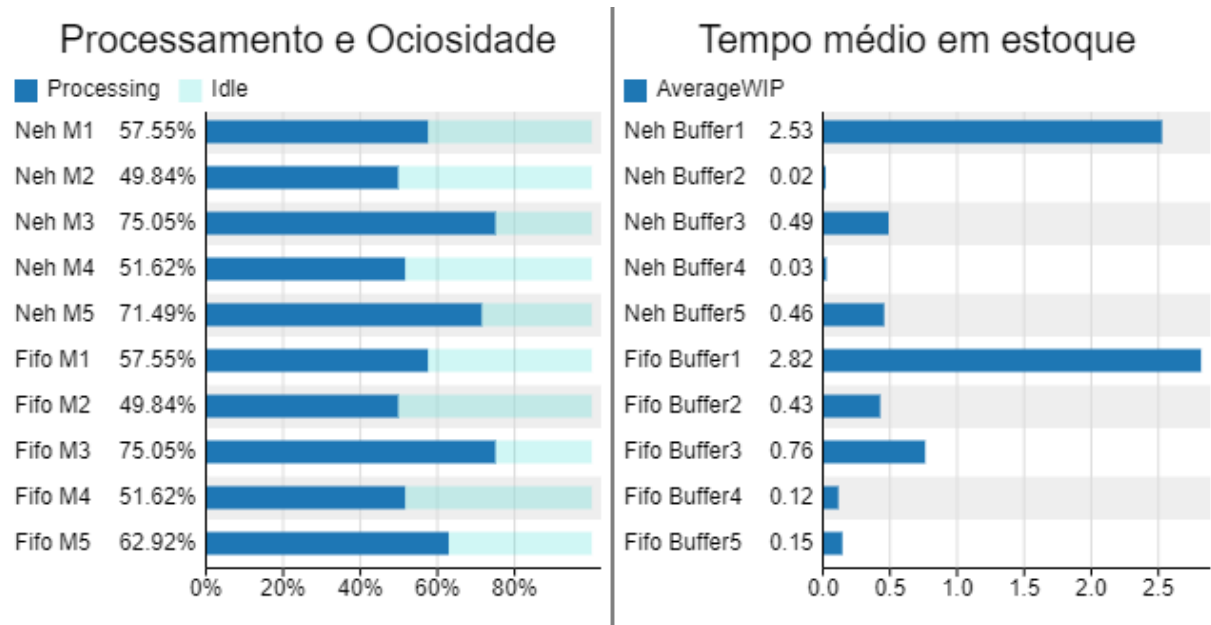
Tempo em estoque médio: NEH obteve, em média, menor tempo em estoque, especialmente na primeira fila.

Figura 7 - Simulação para 5 máquinas. Cenário 1



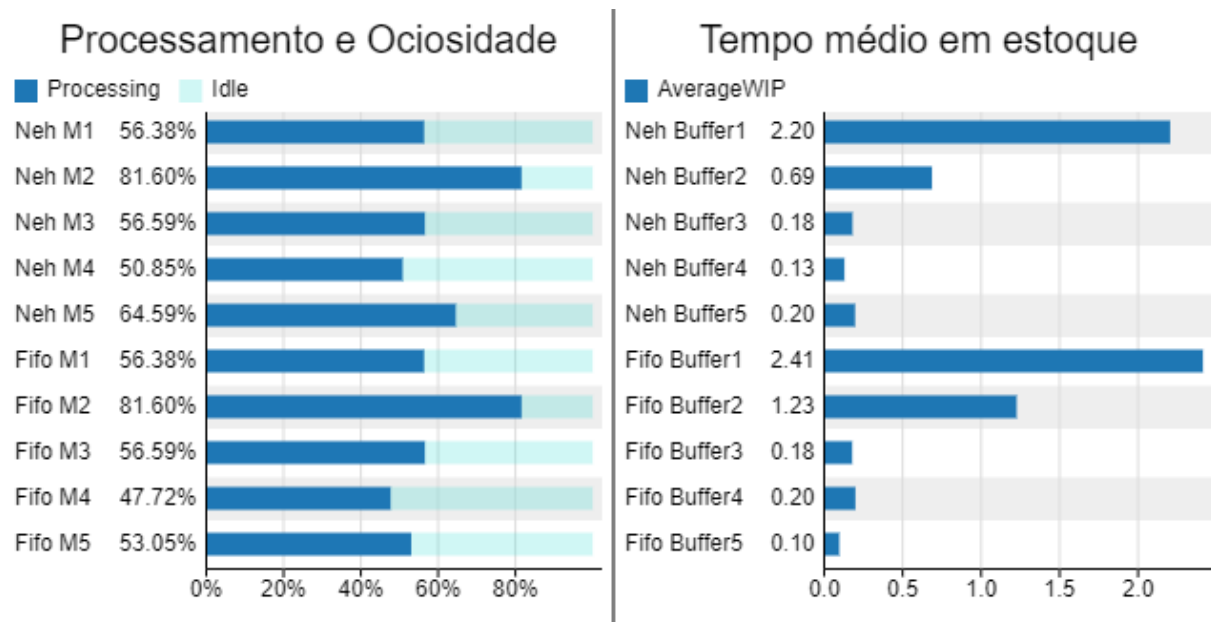
Fonte: Autoria própria.

Figura 8 - Simulação para 5 máquinas. Cenário 2



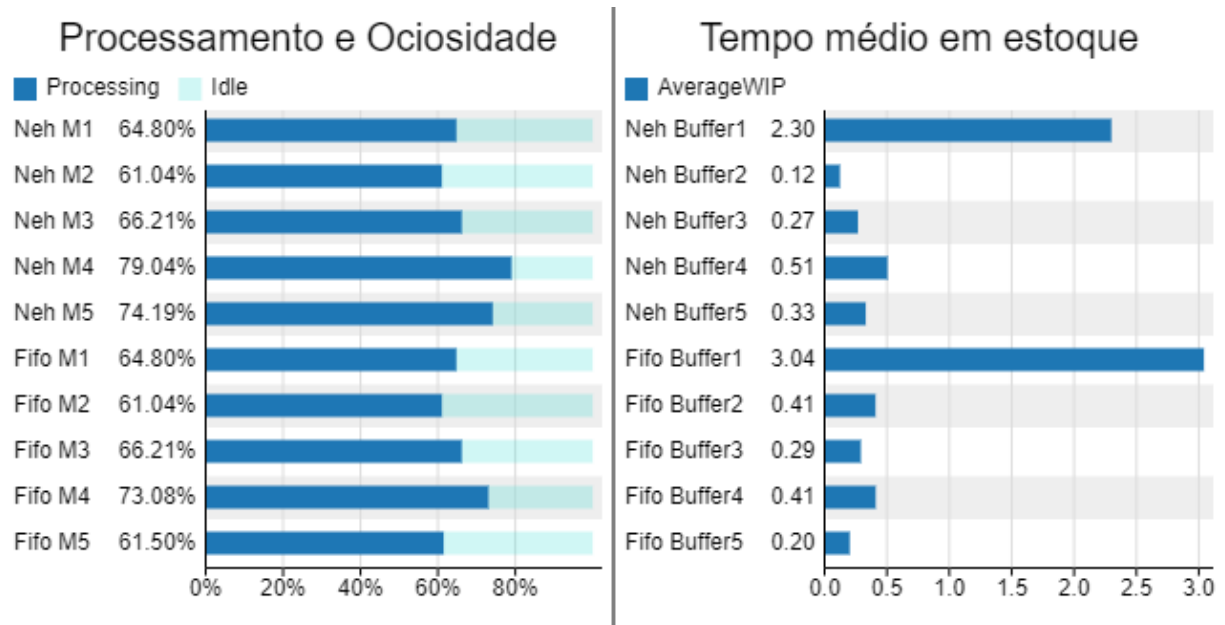
Fonte: Autoria própria.

Figura 9 - Simulação para 5 máquinas. Cenário 3



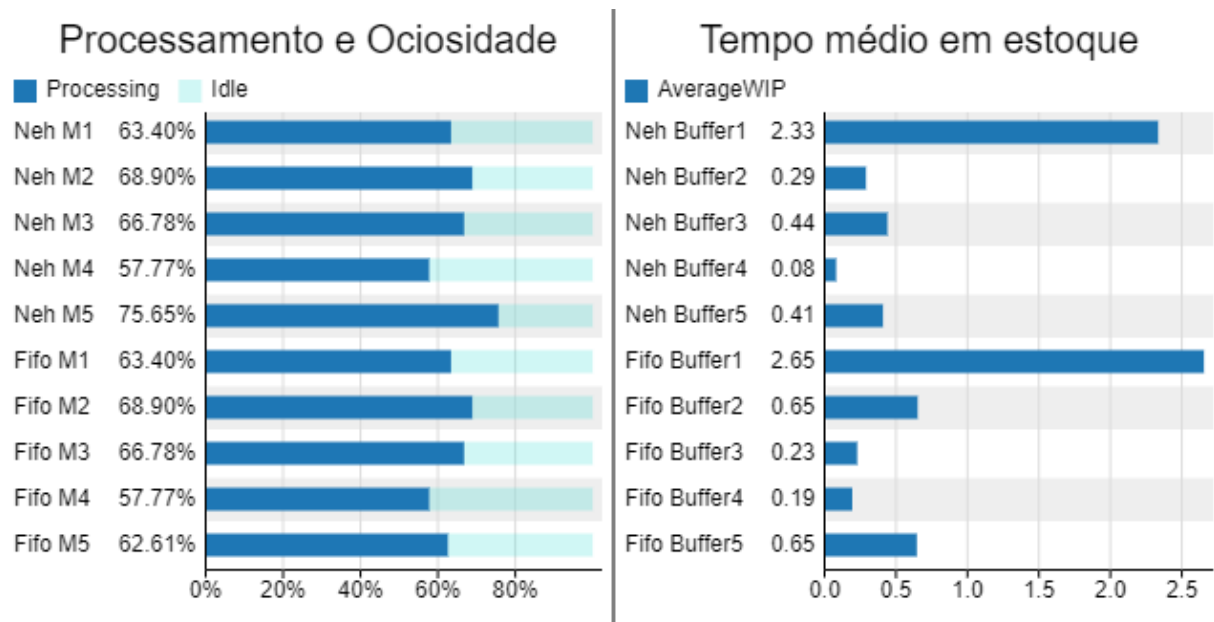
Fonte: Autoria própria.

Figura 10 - Simulação para 5 máquinas. Cenário 4



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 - Simulação para 5 máquinas. Cenário 5



Fonte: Autoria própria.

As figuras 12 e 13 mostram o formato das simulações criadas. Como a movimentação não foi considerada na análise, o leiaute das máquinas não é relevante.

Figura 12 - Simulação para 2 máquinas



Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Simulação para 5 máquinas



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Dentre as regras estudadas em APS, EDD é aconselhada a ser utilizada quando o objetivo for a minimização do atraso máximo. Em situações em que as datas de entrega são maiores em relação aos tempos de processamento, seu uso também é recomendado caso o objetivo seja minimizar a quantidade de tarefas em atraso e *tardiness*.

SPT é a que mais reduz o Fluxo Médio. Na prática, as tarefas seguem pelo sistema com maior fluidez. Além disso, SPT pode garantir que menos tarefas sejam atrasadas em situações em que as datas de entrega são mais curtas em relação aos tempos de processamento.

STR tem resultados próximos a EDD, porém esta última garante melhor desempenho estatisticamente. CRR não é aconselhada por obter maus resultados. FIFO obtém maus resultados por não ter lógica de sequenciamento baseada nos tempos de processamento e datas de entrega, porém seu uso é importante em indústrias que necessitam de alto giro de estoque por conta de validades de produtos, por exemplo.

Já para os métodos, em 2 máquinas, a regra de desempate é o fluxo médio por conta do *makespan* ser o mesmo para Johnson e NEH. Johnson é recomendado quando há menor variabilidade nos tempos de processamento e NEH é aconselhado quando há maior variabilidade.

Para mais de duas máquinas, NEH garante resultados otimizados para *makespan* e fluxo médio em relação a FIFO.

As simulações possibilitaram entender quais são os impactos dos resultados teóricos na prática. O *makespan* tem relação direta com a ociosidade das máquinas. Isto é, quanto menor o *makespan*, menor a ociosidade do sistema. O fluxo médio tem relação com o tempo médio dos produtos em estoque.

REFERÊNCIAS

CARDOSO, Wagner. **Planejamento e Controle da Produção (PCP): a teoria na prática**. 1ª edição. São Paulo: Editora Blucher, 2021.

TUBINO, Dalvio F. **Planejamento e Controle da Produção - Teoria e Prática**. 3ª edição. São Paulo: Atlas, 2017.

GUERRINI, Fabio M. **Planejamento e Controle da Produção - Modelagem e Implementação**. 2ª edição. Grupo GEN, 2018.

LAGE, Murís. **Planejamento e Controle da Produção - Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019.

PINEDO, Michael. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems**. 5ª edição. Local de publicação: Springer, 2016.

BANIN, Sérgio L. **Python 3 - Conceitos e Aplicações - Uma abordagem didática**. 1ª edição. São Paulo: Editora Érica, 2018.

PERKOVIC, Ljubomir. **Introdução à Computação Usando Python - Um Foco no Desenvolvimento de Aplicações**. 1ª edição. LTC. 2016.

RIBEIRO, João A. **Introdução à Programação e aos Algoritmos**. 1ª edição. São Paulo: Grupo GEN, 2019.

LAMBERT, Kenneth A. **Fundamentos de Python: estruturas de dados**. 2ª edição. São Paulo: Editora Cengage Learning Brasil, 2022.

CELES, Waldemar. **Introdução a Estruturas de Dados - Com Técnicas de Programação em C**. 2ª edição. São Paulo: Grupo GEN, 2016.

CURY, Thiago E.; BARRETO, Jeanine dos S.; SARAIVA, Maurício de O.; VETTORAZZO, Adriana de S.; JUNIOR, Ramiro Sebastião C.; SANTOS, Marcela G.; MORAIS, Izabelly S. **Estrutura de Dados**. 1ª edição. São Paulo: Grupo A, 2018.

NETO, Pedro Luiz de Oliveira C. **Estatística**. 1ª edição. São Paulo: Blucher, 2006.

VIEIRA, Sonia. **Fundamentos de Estatística**. 6ª edição. São Paulo: Grupo GEN, 2018.

COSTA, Giovani Glaucio de O. **Curso de Estatística Inferencial e Probabilidades: Teoria e Prática**. 1ª edição. São Paulo: Editora Atlas, 2012.

WERKEMA, Cristina. **Inferência Estatística - Como Estabelecer Conclusões com Confiança no Giro do PDCA e DMAIC**. 1ª edição. São Paulo: Grupo GEN, 2014.

CASELLA, George; BERGER, Roger L. **Inferência Estatística**. 2ª edição. São Paulo: Editora Cengage Learning Brasil, 2018.